

Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil

Experimental mix proportion of concrete made with recycled aggregate from civil construction waste

Clarissa Ribeiro de Sá Rodrigues
Stela Fucale

Resumo

Esta pesquisa apresenta uma investigação sobre concretos confeccionados com agregado reciclado de resíduo da construção civil (RCC), com a finalidade de observar a influência da utilização desse material nas características mecânicas dos concretos. O material utilizado foi coletado em uma obra na Região Metropolitana do Recife, PE, na fase de estrutura, constituído por cerca de 70% de concreto. Foi realizado um estudo de dosagem experimental em concretos com 0%, 50% e 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado, em massa. Foram analisadas as características dos concretos no estado fresco e endurecido. Após a obtenção dos resultados dos ensaios, foram construídos diagramas de dosagem, em que foi possível estudar as correlações entre as propriedades mecânicas dos concretos e as variáveis que influenciam esses parâmetros. Observou-se que os concretos reciclados apresentaram um aumento de volume de argamassa seca, devido às diferenças existentes nos valores de massa específica entre o material natural e o reciclado. Percebeu-se, ainda, que com a substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado houve um incremento na absorção de água e consumo de cimento do concreto reciclado. Houve a diminuição do módulo de elasticidade, o que, contudo não causou grandes prejuízos à resistência à compressão do concreto reciclado, sendo o teor de 50% em massa de substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado o mais adequado.

Palavras-chave: Construção civil. Resíduos. Agregado reciclado. Concreto reciclado.

Abstract

This paper presents an investigation of concrete made with recycled aggregates from Civil Construction Waste (CCW), in order to observe the influence of this material on the mechanical characteristics of concrete. The material used was collected on a construction site located in the metropolitan area of Recife-PE, and it comprised of 70% of concrete. A study was made of an experimental mix proportion in concretes made with 0%, 50% and 100% replacement of natural fine aggregate by recycled fine aggregate. The characteristics of concrete in the fresh state and in the hardest state were analysed. After obtaining the results of the experiments, mix proportion diagrams were made so that it was possible to study the correlations between the mechanical properties of the recycled concrete and analyse the parameters that influence it. It was observed that the recycled concrete had higher volumes of dry mortar because of the different density between the natural and the recycled material. The results showed that the replacement of the natural fine aggregate caused an increase in water absorption and cement consumption in the recycled concrete. There was also a decrease in the modulus of elasticity, without much damage to the compressive strength of the recycled concrete. The study indicates that the 50% proportion of replacement of natural aggregate by recycled fine aggregate was more appropriate.

Clarissa Ribeiro de Sá Rodrigues
Universidade de Pernambuco
Recife - PE - Brasil

Stela Fucale
Universidade de Pernambuco
Recife - PE - Brasil

Recebido em 10/01/13
Aceito em 01/03/14

Keywords: Construction. Construction waste. Recycled aggregate. Concrete. Recycled concrete.

Introdução

A construção civil, atualmente, é um dos principais setores da economia brasileira. Há registros do aumento da parcela correspondente à construção civil no produto interno bruto (PIB) nacional desde 1995 (FEDERAÇÃO..., 2010). Em 2011, no Brasil, o setor foi responsável pelo crescimento de 3,6% do PIB na atividade da indústria (IBGE, 2011).

Apesar do desenvolvimento proporcionado pelo setor, este provoca grandes impactos ao meio ambiente. A construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais de qualquer economia (JOHN, 2000), o que pode ser uma das causas de uma problemática já presente na cadeia, a escassez de matéria-prima (FEDERAÇÃO..., 2010).

Há impactos provenientes da alta geração de resíduo oriundos das atividades construtivas não só ambientais, mas também econômicos, pois cerca de 70 milhões de toneladas de RCC são gerados anualmente pelo setor (ANGULO, 2005). Estima-se que metade desse material seja depositada irregularmente em meio urbano, ocasionando gastos na ordem de milhões para as prefeituras municipais darem destino adequado a esses RCC (GUSMÃO, 2008).

Um dos grandes motivadores para a realização desta pesquisa, com o foco em agregados miúdos reciclados, além da busca ao combate dos impactos ambientais que surgem pela exploração de matéria-prima natural e geração de RCC, é a grande dificuldade que ainda existe na correta deposição desse material e a dificuldade na aquisição do agregado miúdo, que apresentou um grande aumento em seu valor nos últimos anos no Brasil (LA SERNA; RESENDE, 2009). Além disso, pesquisas apontam que o agregado miúdo reciclado de RCC produz menores efeitos às propriedades mecânicas do concreto do que os agregados graúdos (CABRAL, 2007; LEITE, 2001).

É importante ressaltar que, como os resíduos de RCC são heterogêneos e os processos construtivos podem interferir na qualidade do material gerado, é importante o estudo do comportamento do agregado reciclado em diferentes regiões. Por isso, uma das principais contribuições deste estudo é ser um dos pioneiros no estado de Pernambuco.

Influência dos agregados reciclados no comportamento do concreto

Concretos produzidos com agregados reciclados de RCC apresentam uma perda de trabalhabilidade e

aumento do consumo de cimento devido à alta absorção de água desse material (ANGULO, 2005; LEITE, 2001; LEVY, 1997; ZORDAN, 1997). O agregado miúdo reciclado apresenta menor massa específica do que o agregado natural devido a sua maior porosidade, o que lhe proporciona uma absorção de água cerca de 80% superior ao material natural (EVANGELISTA; BRITO, 2010).

A massa específica do concreto no estado fresco depende da massa específica do agregado e de sua porosidade, bem como de sua textura, forma e tamanho das partículas (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Essa propriedade, para concretos com agregados reciclados, é, no geral, menor que a de concretos de referência (convencionais), devido, principalmente, à porosidade, ao formato das partículas sólidas e à natureza do material utilizado, que podem promover o aumento da relação água/cimento (a/c) e, conseqüentemente, a diminuição da massa específica do concreto reciclado (YAPRAK *et al.*, 2011; CARRIJO, 2005; BUTTLER, 2003; LEITE, 2001).

Concreto no estado endurecido

Os concretos produzidos com agregados reciclados apresentam maior absorção de água e índice de vazios quando comparados com os concretos convencionais. Essa característica ocorre em função do aumento da relação a/c , redução da massa específica, permeabilidade e composição dos agregados reciclados (EVANGELISTA; BRITO, 2010; LOVATO, 2007; TENÓRIO, 2007; CARRIJO, 2005).

Estudos apontam que é viável a utilização de agregado reciclado de RCC para a produção de concretos (JI CHEN; YEN; HUNG CHEN, 2003; LEITE, 2001). Contudo, a relação a/c deve ser levada em consideração, já que é um dos principais fatores que afetam a resistência à compressão dos agregados reciclados (CABRAL, 2010).

A porosidade é uma das propriedades que mais afetam o módulo de elasticidade do concreto. Isso se deve ao fato de que a porosidade do agregado determina sua rigidez, o que, por sua vez, controla a capacidade do agregado de resistir à deformação da matriz (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Os concretos reciclados, no geral, apresentam diminuição do módulo de elasticidade com o incremento de agregado miúdo reciclado em sua mistura (EVANGELISTA; BRITO, 2007). Esse fator é atribuído à relação a/c , à porosidade, ao teor e à massa específica dos agregados reciclados, que são algumas das variáveis que mais influenciam os valores do módulo de elasticidade. Por exemplo,

quanto maior for a relação a/c e o teor de agregado reciclado utilizado na produção do concreto, menor será o valor do módulo de elasticidade (CARRIJO, 2005; LEITE, 2001).

Objetivos

Visando ao aprofundamento do conhecimento das propriedades dos agregados reciclados, bem como a sua utilização para a produção de concretos, o presente estudo tem o objetivo de realizar a dosagem de concretos produzidos com agregado reciclado utilizando RCC, proveniente uma amostra coletada na cidade de Recife, PE, podendo, assim, observar a influência da utilização desse material nas características mecânicas dos concretos e verificar a proporção mais adequada dele para a produção de concretos.

Metodologia

Os procedimentos utilizados para a realização da pesquisa experimental estão divididos em quatro etapas principais. A primeira é a fase preparatória, em que foi coletada e preparada a amostra utilizada na pesquisa. A segunda etapa corresponde à caracterização do agregado natural, reciclado e aglomerante, utilizados para a preparação do concreto, por meio de ensaios laboratoriais. Na terceira, realizou-se a dosagem experimental do concreto convencional e reciclado, com teores de substituição de 0%, 50% e 100% em massa, e moldados corpos de prova cilíndricos para o estudo das características do concreto produzido com agregado natural e reciclado. E, por fim, após a realização dos ensaios do concreto no estado fresco e endurecido, foram montados diagramas de dosagens e modelos matemáticos que possibilitaram conhecer as correlações entre as propriedades mecânicas dos concretos e as variáveis que influenciam esses parâmetros.

Preparação e caracterização dos materiais

O material empregado para o desenvolvimento da fase experimental desta pesquisa foi uma amostra de resíduo da construção civil gerado em uma obra de edificação residencial de múltiplos pavimentos, na etapa de estrutura, da cidade de Recife.

Foi realizada a análise da composição gravimétrica do material, com o intuito de determinar a natureza dos materiais constituintes do resíduo, a partir da separação visual, de acordo com o tipo de material existente em sua composição e posterior pesagem.

Para que a amostra fosse submetida aos ensaios previstos na pesquisa, realizou-se o beneficiamento

do material coletado, que consistiu em reduzir o tamanho das partículas da amostra por meio de um britador de mandíbulas de escala laboratorial. Utilizou-se toda a fração passante na peneira de malha # 2,4 mm. Tal procedimento foi realizado com base na aproximação da granulometria da areia natural utilizada durante a pesquisa. Para a realização dos ensaios de caracterização, todo o material foi homogeneizado manualmente e quarteadado, pelo método do cone achatado.

Para o agregado miúdo natural, utilizou-se areia lavada proveniente do rio Sirinhaém, PE. Todo o material foi seco ao ar, homogeneizado manualmente e, em seguida, passado na peneira de malha #4,8 mm, sendo retirada, assim, toda a fração superior a essa malha.

Como agregado graúdo natural, utilizou-se brita com dimensão máxima característica de 19 mm, por ser uma granulometria comumente utilizada nos canteiros de obras da região. Esse agregado foi lavado para a retirada do material pulverulento, com o intuito de se analisar apenas a influência dos materiais pulverulentos dos agregados miúdos reciclados, e, por fim, colocado para secar ao ar. Vale ressaltar que não foi utilizado agregado graúdo reciclado.

Os agregados miúdos (natural e reciclado) e o graúdo (natural) foram submetidos aos seguintes ensaios de caracterização: análise granulométrica (ABNT, 2003a), massa específica (ABNT, 2009a; 2009b), teor de material pulverulento (ABNT, 2003b) e absorção de água (ABNT, 2001). Os resultados dos ensaios estão apresentados nas discussões.

Para a produção dos concretos, utilizou-se nesta pesquisa o cimento Portland composto com pozolana (CPII Z-32), pelo fato de ser comumente utilizado na região.

Dosagem experimental

Nesta pesquisa foi adotado o método de dosagem IBRACON (HELENE, 2005) para a confecção dos concretos estudados. De acordo com essa metodologia, são necessários no mínimo três pontos, que são utilizados para construir o diagrama de dosagem, correlacionando-se resistência à compressão, relação água/cimento, traço e consumo de cimento.

O início do procedimento dá-se com a determinação do teor ideal de argamassa utilizando um traço intermediário. A proporção adequada de argamassa é encontrada a partir de tentativas e observações práticas, realizando-se acréscimos sucessivos de argamassa na mistura. Em seguida, tomando-se como base as informações da mistura

inicial (traço intermediário), são executados mais dois traços, um mais pobre e outro mais rico em cimento (HELENE, 2005).

Inicialmente, foi fixado o abatimento do tronco de cone em $100 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$, e o traço intermediário em 1:5,0 (cimento: agregados secos, em massa), para o qual se determinou a proporção adequada de argamassa por tentativas, acrescentando aos poucos cimento e areia na mistura, como mencionado anteriormente. Quando o concreto apresentava-se coeso, sem vazios na superfície, sem desprendimento dos agregados, realizava-se o

ensaio de abatimento prescrito na NM 67 (ABNT, 1998). Caso não se atingisse o abatimento especificado ($100 \pm 20 \text{ cm}$), acrescentava-se quantidade de água suficiente para chegar à trabalhabilidade desejada. As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam os valores encontrados.

Pode ser observado, nas Tabelas 1, 2 e 3, que houve aumento, principalmente nos traços pobres, da relação a/c total na medida em que o agregado miúdo reciclado foi acrescentado nas misturas, revelando o alto poder de absorção do agregado reciclado de RCC.

Tabela 1 - Traços calculados a partir do estudo de dosagem - concreto de referência (CRE)

Traço em massa	Número	T ₁	T ₂	T ₃
	1:m	1:3,5	1:5,0	1:6,5
	1:a:b	1:1,57:1,93	1:2,42:2,58	1:3,28:3,22
Teor de argamassa	%	57	57	57
Relação a/c		0,48	0,63	0,86
Consumo por m ³ de concreto	Cimento kg/m ³	470	352	275
	Água l/m ³	226	222	237
Relação água/materiais secos (A%)		10,6	10,5	11,5

Tabela 2 - Traços calculados a partir do estudo de dosagem - concreto reciclado com 50% de substituição de agregado natural pelo reciclado (C50AMR)

Traço em massa	Número	T ₁	T ₂	T ₃
	1:m	1:3,5	1:5,0	1:6,5
	1:a:b	1:1,66:1,84	1:2,54:2,46	1:3,43:3,07
Teor de argamassa	%	59	59	59
Relação a/c		0,55	0,71	0,91
Consumo por m ³ de concreto	Cimento kg/m ³	450	340	270
	Água l/m ³	249	242	246
Relação água/materiais secos (A%)		12,2	11,8	12,1

Tabela 3 - Traços calculados a partir do estudo de dosagem - concreto reciclado com 100% de substituição de agregado natural pelo reciclado (C100AMR)

Traço em massa	Número	T ₁	T ₂	T ₃
	1:m	1:3,5	1:5,0	1:6,5
	1:a:b	1:1,84:1,66	1:2,78:2,22	1:3,73:2,77
Teor de argamassa	%	63	63	63
Relação a/c		0,61	0,83	1,01
Consumo por m ³ de concreto	Cimento kg/m ³	437	325	261
	Água l/m ³	268	270	264
Relação água/materiais/secos (A%)		13,5	13,8	13,5

Preparo, moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova de concreto foram moldados e curados de acordo com a prescrição da NBR 5738 (ABNT, 2003c). Foram moldados, para cada traço de concreto produzido, 30 corpos de prova, totalizando 270 CPs, em formas cilíndricas metálicas de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Foi adotado o processo de adensamento manual, em duas camadas, como prevê a norma supracitada, e a cura dos corpos de prova foi realizada ao ar nas primeiras 24 horas. Após esse período, foram desmoldados e curados em câmara úmida até a data de execução dos ensaios, em idades que variaram entre 3 e 91 dias

Métodos de ensaio

Para análise das características dos concretos produzidos, fez-se necessária a realização de ensaios tanto no estado fresco como no endurecido, tendo como base as seguintes normas: determinação de Consistência pelo abatimento do tronco de cone – NBR NM 67 (ABNT, 1998), Massa específica – NBR 9833 (ABNT, 2008a), Absorção de água – NBR 9778 (ABNT, 2005a), Resistência à compressão simples – NBR 5739 (ABNT, 2007) e Módulo estático de elasticidade – NBR 8522 (ABNT, 2008b).

Estudo do comportamento teórico do concreto

Depois de obtidos os resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, foram construídos diagramas de dosagem e modelos matemáticos, que possibilitaram o estudo das correlações entre as propriedades mecânicas dos concretos estudados e as variáveis que influenciam esses parâmetros.

Resultados e discussões

Caracterização dos materiais

Composição do agregado reciclado de RCC

Foi realizada a análise da composição gravimétrica do resíduo coletado, em que se separou todo o material de acordo com sua natureza e, posteriormente, pesou-se cada fração. A partir dos resultados obtidos, determinou-se a porcentagem em massa de cada constituinte da amostra, conforme a Tabela 4.

Observou-se, após a pesagem do resíduo, que apenas 0,05% do material classificado como madeira, papel, metais ou trapos apresentava-se presente na amostra, e optou-se por desprezar esse material devido a sua pequena ocorrência. Foi verificado também que a amostra apresentou predominância de concreto (69%), tendo em vista a fase da obra em que o resíduo foi coletado.

Agregados

Composição granulométrica

A Figura 1 apresenta o resultado da análise da composição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos estudados e respectivos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005b). Verifica-se que os agregados miúdos estão dentro dos limites estabelecidos pela norma supracitada. Além disso, o agregado natural apresentou módulo de finura 2,62 e dimensão máxima característica de 4,8 mm, enquanto o agregado reciclado apresentou os resultados de 2,56 e 2,4 mm respectivamente.

Absorção de água, teor de material pulverulento e massa específica

Foram realizados ensaios de absorção de água, teor de material pulverulento e massa específica para os agregados utilizados na pesquisa, os quais são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 - Percentual em massa dos constituintes da amostra de resíduo da construção civil coletada em uma obra da cidade de Recife, PE

Constituinte	Massa (kg)	Porcentagem (%)
Material miúdo*	26,24	3
Tijolo cerâmico	34,70	4
Argamassa	11,00	1
Concreto	686,42	69
Misto**	232,68	23
Total	991,55	100

Nota: * Material passante na peneira # 4,8 mm. ** Mais de um tipo de material incorporado de difícil distinção (argamassa + tijolo).

Figura 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural, miúdo reciclado e agregado graúdo natural utilizado na pesquisa e limites recomendados pela NBR 7211 (ABNT, 2005b)

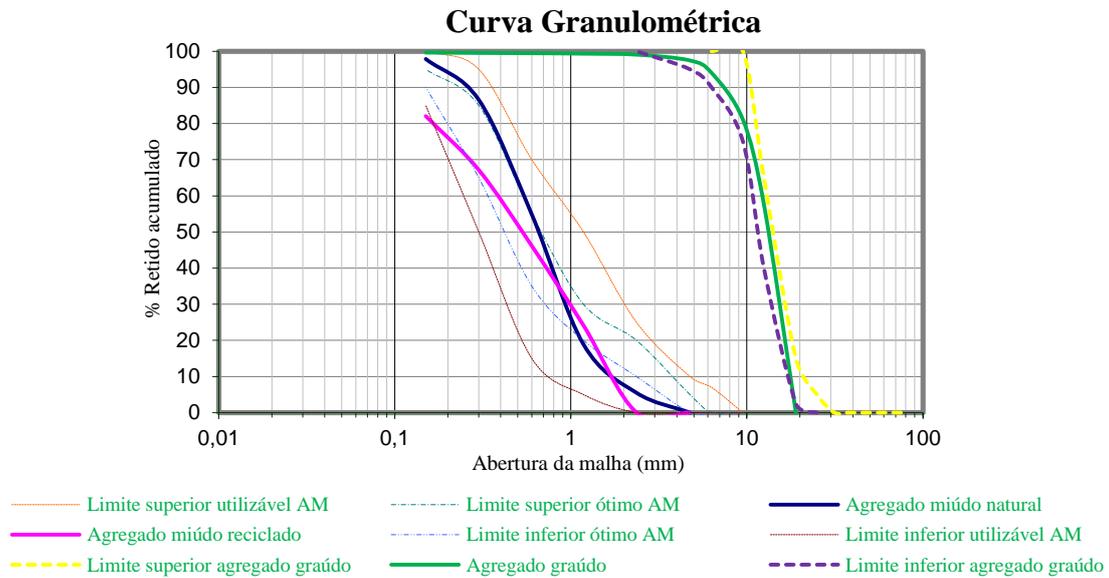


Tabela 5 - Resultados de ensaios realizados nos agregados

Agregado	Absorção de água (%)	Massa específica real (kg/dm ³)	Teor de mat. pulverulento (%)
Miúdo natural	1,00	2,62	1,0
Miúdo reciclado	10,0	2,54	8,7
Graúdo natural	0,33	2,70	0,4

Verifica-se que o agregado miúdo reciclado, após 24 h de imersão, apresenta absorção cerca de 10 vezes maior em comparação ao agregado miúdo natural. A massa específica e a absorção de água são inversamente proporcionais, pois, quanto menor a densidade, maior é o número de poros presentes nas partículas sólidas. Destaca-se também a grande quantidade de finos presentes no agregado miúdo reciclado, cerca de oito vezes maior que o agregado natural.

Concreto no estado fresco

Trabalhabilidade

Durante a dosagem do concreto reciclado, percebeu-se a perda de trabalhabilidade e de coesão ao utilizar a mesma relação a/c do concreto de referência (CRE), havendo, assim, a necessidade do incremento de água à medida que se acrescentou agregado miúdo reciclado (AMR) à mistura, conforme a Tabela 6. Contudo, como os agregados reciclados não foram pré-umedecidos, essa é a relação a/c total, e, assim, a relação a/c efetiva é menor do que a apresentada. Não foi acrescentado aditivo na mistura, pois a pesquisa

tinha o objetivo de analisar a substituição do RCC sem a influência dele.

Para se atingir o abatimento especificado, houve aumento no volume de argamassa seca, pois o traço foi fixado em massa. Ao substituir-se o agregado miúdo natural pelo reciclado, houve aumento no volume da areia, devido às diferenças existentes nos valores de massa específica entre material natural e reciclado.

Massa específica no estado fresco

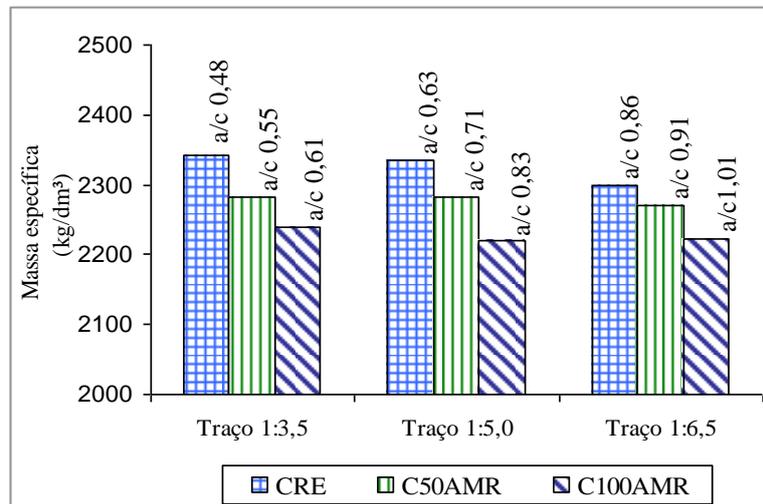
A Figura 2 apresenta os resultados do ensaio de massa específica do concreto no estado fresco.

Observa-se diminuição desse parâmetro com o aumento do teor de substituição do agregado reciclado, conforme a Figura 2. O mesmo resultado foi encontrado por Yaprak *et al.* (2011). Comparando o concreto de referência com os concretos reciclados, produzidos com 50% e 100% de teor de agregado miúdo reciclado, verifica-se que os concretos do mesmo traço (1:m) apresentaram diminuição média de 3% do valor da massa específica, à medida que houve aumento do teor de AMR.

Tabela 6 - Relação a/c total dos concretos estudados

Teor de substituição	Traço 1:3,5	Traço 1:5,0	Traço 1:6,5
CRE	0,48	0,63	0,86
C50AMR	0,55	0,71	0,91
C100AMR	0,61	0,83	1,01

Figura 2 - Massa específica das famílias de concreto estudadas



Nota: *Relação a/c total.

Como a massa específica do concreto reciclado é intimamente ligada à massa específica do agregado, espera-se diminuição desse parâmetro com o incremento do agregado reciclado, pois a massa específica do agregado reciclado é 4% menor que do agregado miúdo natural.

Além disso, a relação a/c e, conseqüentemente, o consumo de água nos concretos reciclados apresentam valores superiores quando comparados ao concreto de referência, o que acarreta diminuição da massa específica dos concretos reciclados, devido à maior porosidade deles.

Concreto no estado endurecido

Absorção de água

A Figura 3 apresenta os resultados do ensaio de absorção após 72 h de submersão.

Ao analisarem-se os resultados encontrados, verifica-se que todas as propriedades do concreto estão intimamente ligadas, pois, à medida que houve incremento de agregado reciclado de RCC da mistura, houve também aumento de relação a/c. Logo, ocorreu aumento da quantidade de vazios no concreto, diminuição de sua massa específica e, por conseqüência, aumento da absorção de água.

Outros estudos chegaram aos mesmos resultados encontrados. Levy (2001) encontrou valores de

absorção de água de concreto reciclado até 60% superiores em relação ao concreto de referência, enquanto Butler (2003) e Souza e Cabral (2009) chegaram a valores de aproximadamente 50% superiores. A alta absorção do agregado reciclado é consenso na literatura, característica intrínseca do concreto reciclado associada a aumento da relação a/c, diminuição da densidade, aumento da porosidade e composição dos agregados reciclados (CARRIJO, 2005; FONSECA, 2006; LOVATO, 2007; TENÓRIO, 2007).

Propriedades mecânicas

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados encontrados para resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos estudados.

Verifica-se que os concretos fabricados com agregado reciclado apresentaram apenas pequena redução na resistência à compressão quando comparados ao concreto de referência. Observa-se na Tabela 7 que o concreto com 50% de substituição não sofreu grande influência, já os concretos com teores de 100% de AMR apresentaram pequenas quedas nos valores de resistência à compressão, contudo não chegaram a ultrapassar 2% de redução.

Figura 3 - Absorção de água dos concretos (% de massa)

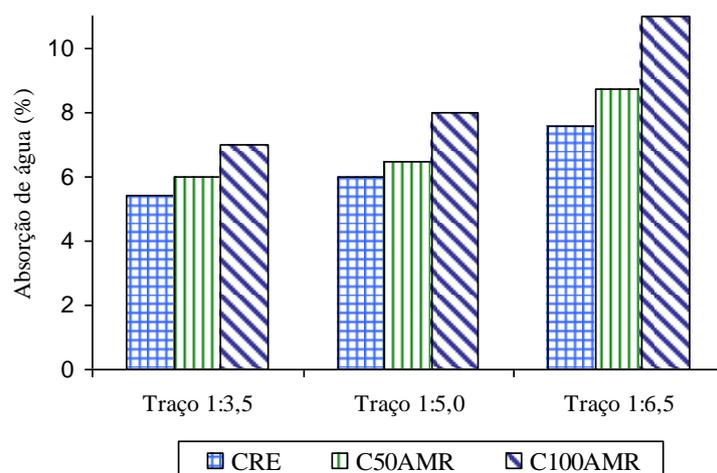


Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão

Idade (dias)	Teor de substituição	Resistência à compressão f_c (MPa)		
		1:3,5	1:5,0	1:6,5
3	CRE	22,2	12,7	8,3
	C50AMR	18,9	13,2	7,4
	C100AMR	18,0	10,3	6,6
7	CRE	24,9	17,9	10,6
	C50AMR	22,2	16,5	9,9
	C100AMR	20,1	14,4	9,5
28	CRE	31,9	21,9	10,7
	C50AMR	31,00	22,7	14,3
	C100AMR	27,9	20,9	12,8
91	CRE	40,0	27,7	19,7
	C50AMR	40,0	29,7	18,4
	C100AMR	35,75	26,2	18,0

Tabela 8 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade

Idade (dias)	Teor de substituição	Módulo de elasticidade E_c (GPa)		
		1:3,5	1:5,0	1:6,5
3	CRE	22,2	18,2	15,6
	C50AMR	20,5	17,1	12,7
	C100AMR	17,1	14,0	11,3
7	CRE	22,5	21,2	17,3
	C50AMR	21,5	19,6	14,7
	C100AMR	19,3	16,2	14,5
28	CRE	28,6	26,5	21,5
	C50AMR	27,1	24,4	22,0
	C100AMR	25,0	21,4	19,9
91	CRE	27,1	25,6	22,3
	C50AMR	26,5	24,8	20,2
	C100AMR	22,6	21,7	18,9

Verifica-se na Tabela 8 que houve queda do módulo de elasticidade com o incremento de agregado reciclado na mistura. Essa redução aos 91 dias ficou em torno de 5% para os concretos com 50% de teor de AMR e de 15% para os

concretos com 100% de AMR. Esse comportamento pode ser atribuído à menor massa específica do agregado reciclado, fato já observado na literatura. Angulo (2005) encontrou valores de módulo de elasticidade até 47% inferiores para os

concretos reciclados, que, segundo o autor, sofreram influência da porosidade do agregado. Segundo Levy (1997), isso ocorre devido à antiga camada de argamassa aderida à superfície do agregado de concreto e à maior porosidade dos concretos que compõem o resíduo, o que pode ser aplicado ao resíduo estudado, que possui em sua composição cerca de 70% de concreto, além de ter apresentado alta taxa absorção (10,28%).

Estudo teórico do comportamento dos concretos

A partir dos resultados obtidos, foi possível montar os modelos matemáticos que possibilitam o cálculo das propriedades teóricas dos concretos estudados. As equações obtidas são apresentadas nas Tabelas 9, 10, 11 e 12.

A partir das equações foi possível calcular as propriedades teóricas dos concretos estudados, assim como seus respectivos diagramas de dosagem, fixando-se parâmetros como resistência à compressão. Montaram-se exemplos pontuais para comparação do comportamento dos concretos reciclados e de referência, fixando-se a resistência à compressão aos 28 dias em 30 MPa e consumo de cimento em 350 kg/m³. Tais escolhas foram realizadas por serem parâmetros comumente utilizados nas obras brasileiras. Os diagramas de dosagem são representados nas Figuras 4 e 5.

Utilizando-se as equações encontradas, foi estabelecida a resistência à compressão $f_{c28} = 30$ MPa (Tabela 12) e consumo de cimento em 350 kg/m³ (Tabela 13).

Tabela 9 - Equações de dosagem - Resistência à compressão (MPa) em função da relação a/c (kg/kg)

Concreto	Equações para Lei de Abrams			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
CRE	$f_{c_3} = \frac{69,35}{12,34^{a/c}}$	$f_{c_7} = \frac{73,46}{9,44^{a/c}}$	$f_{c_{28}} = \frac{130,92}{18,10^{a/c}}$	$f_{c_{91}} = \frac{92,45}{6,20^{a/c}}$
C50AMR	$f_{c_3} = \frac{81,4}{13,70^{a/c}}$	$f_{c_7} = \frac{77,90}{9,41^{a/c}}$	$f_{c_{28}} = \frac{102,14}{8,57^{a/c}}$	$f_{c_{91}} = \frac{133,61}{8,68^{a/c}}$
C100AMR	$f_{c_3} = \frac{82,49}{12,15^{a/c}}$	$f_{c_7} = \frac{64,08}{6,42^{a/c}}$	$f_{c_{28}} = \frac{93,53}{6,77^{a/c}}$	$f_{c_{91}} = \frac{117,82}{6,32^{a/c}}$

Tabela 10 - Equações de dosagem - teor de agregados secos (m) em função da relação a/c (kg/kg); consumo de cimento em relação ao teor de agregados secos (m)

Concreto	Quadrante de Lyse		Quadrante de Molinari	
	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = 7,78 \times a/c - 0,11$	$y = f(x)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{0,34 + 0,5 \times m}$
CRE	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = 7,78 \times a/c - 0,11$	$y = f(x)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{0,34 + 0,5 \times m}$
C50AMR	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = 8,3 \times a/c - 1,00$	$y = f(x)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{0,47 + 0,5 \times m}$
C100AMR	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = 7,47 \times a/c - 1,1$	$y = f(x)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{0,48 + 0,52 \times m}$

Tabela 11 - Equações de dosagem do módulo de elasticidade do concreto de referência em função da relação a/c (kg/kg)

Concreto	Equações $y = f(x)$ $E_{c_i} = f(a/c)$			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
CRE	$E_{c_3} = \frac{33,36}{2,46^{a/c}}$	$E_{c_7} = \frac{32,20}{2,03^{a/c}}$	$E_{c_{28}} = \frac{41,89}{2,15^{a/c}}$	$E_{c_{91}} = \frac{35,23}{1,69^{a/c}}$
C50AMR	$E_{c_3} = \frac{42,94}{3,76^{a/c}}$	$E_{c_7} = \frac{39,78}{2,91^{a/c}}$	$E_{c_{28}} = \frac{37,20}{1,79^{a/c}}$	$E_{c_{91}} = \frac{41,25}{2,15^{a/c}}$
C100AMR	$E_{c_3} = \frac{32,03}{2,77^{a/c}}$	$E_{c_7} = \frac{29,61}{2,04^{a/c}}$	$E_{c_{28}} = \frac{35,28}{1,78^{a/c}}$	$E_{c_{91}} = \frac{29,96}{1,54^{a/c}}$

Figura 4 - Diagrama de dosagem dos concretos aos 28 dias - resistência à compressão (MPa)

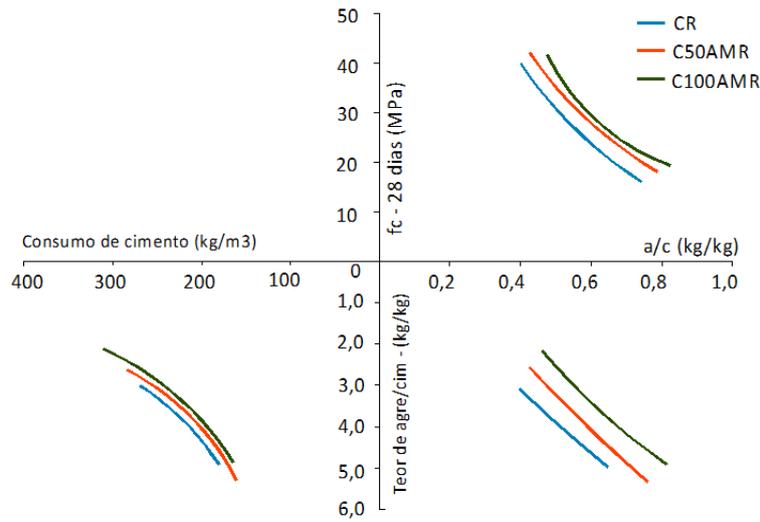


Figura 5 - Diagrama de dosagem dos concretos aos 28 dias - módulo de elasticidade (GPa)

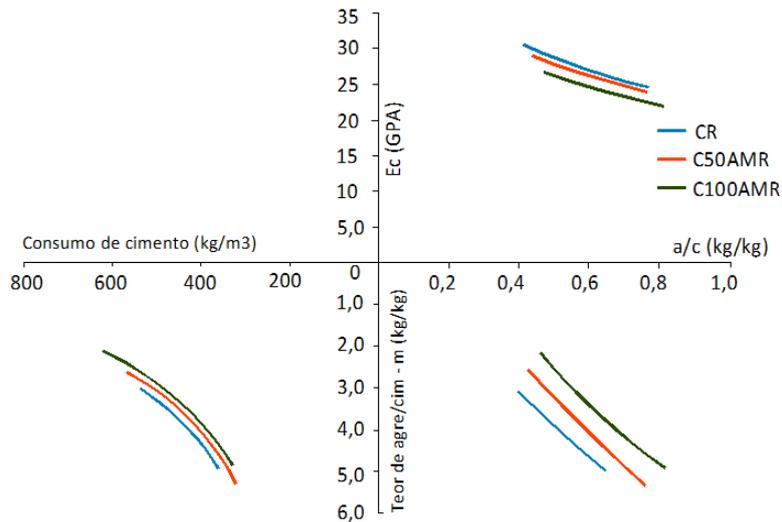


Tabela 12 - Propriedades teóricas dos concretos estudados fixando-se a resistência à compressão $f_{c28} = 30$ MPa

Concreto	$f_{28\text{dias}}$ (MPa)	a/c(total)	m	C_{cimento} (kg/m ³)	E_c (GPa)	A%	$M_{\text{especifica}}$ (kg/dm ³)
CRE	30	0,509	3,85	441	28,37	10,49	2,36
C50AMR	30	0,569	3,72	439	26,76	12,05	2,32
C100AMR	30	0,593	3,33	456	25,06	13,69	2,24

Tabela 13 - Propriedades teóricas dos concretos estudados fixando-se o consumo de cimento $C_{\text{cim}} = 350$ kg/m³

Concreto	C_{cim} (kg/m ³)	$f_{28\text{dias}}$ (MPa)	a/c (total)	m	E_c (GPa)	A%	$M_{\text{especifica}}$ (kg/dm ³)
CRE	350	19,30	0,66	5,03	25,3	10,95	2,34
C50AMR	350	22,2	0,71	4,87	24,6	12,05	2,30
C100AMR	350	21,6	0,76	4,61	22,7	13,62	2,23

Observa-se na Tabela 12 que, para se atingir um mesmo valor de resistência à compressão, é necessário um aumento do consumo de cimento e, conseqüentemente, de água, devido à maior porosidade e quantidade de finos do material reciclado. Conhecendo-se o consumo de cimento, o traço em massa e a relação a/c, foi possível a realização do cálculo da massa específica do concreto. Verifica-se que houve diminuição da massa específica nos concretos reciclados, o que pode estar relacionado à menor massa específica do agregado reciclado de RCC (YAPRAK *et al.*, 2011).

Observa-se na Tabela 13 que, ao manter-se o mesmo consumo de cimento nas misturas de concreto, não há alterações significativas nos valores de resistência à compressão, tendo o concreto reciclado apresentado desempenho superior quando comparado com o convencional, fato que pode ser atribuído à diminuição da relação a/c efetiva nos concretos reciclados, pois uma parte da água de amassamento foi absorvida pelos agregados reciclados, que apresentam elevada porosidade e não foram pré-umedecidos, o que já foi observado na literatura (VIEIRA, 2003; LEITE, 2001). Outra justificativa para o aumento da resistência à compressão nos concretos reciclados seria um possível efeito filler do material pulverulento presente no agregado reciclado, que é composto basicamente de material cimentício.

Conclusão

Os resultados apontam que a adoção de um teor de argamassa seca fixo (em massa), prática usual num estudo de dosagem convencional, implica um aumento de volume, quando são utilizados teores crescentes de agregados miúdos reciclados.

A relação a/c total também apresentou mesma tendência de crescimento com o aumento de agregado reciclado durante a confecção dos concretos. A dificuldade de atingirem-se a trabalhabilidade e o abatimento dos concretos reciclados apresentou-se proporcional ao aumento dos teores de substituição do agregado reciclado de RCC.

Fixando-se o valor de resistência à compressão em 30 MPa, percebeu-se que, na mistura com substituição de 50% do agregado natural pelo reciclado, não houve praticamente alterações nos valores do consumo de cimento, apresentando-se, ainda, aumento da plasticidade do material, possivelmente pelo maior teor de material pulverulento do agregado reciclado.

Ao manter-se o mesmo consumo (350 kg/m³) de cimento nas misturas de concreto, não houve

alterações significativas nos valores de resistência à compressão, tendo o concreto reciclado apresentado desempenho superior quando comparado com o de referência ($f_{28 \text{ dias}}^{\text{CRE}} = 19,3$ MPa, $f_{28 \text{ dias}}^{\text{C50AMR}} = 22,2$ MPa, $f_{28 \text{ dias}}^{\text{C100AMR}} = 21,6$ MPa), devido à diminuição da relação a/c efetiva nos concretos reciclados.

Observou-se que, para a amostra de agregado miúdo reciclado estudado nesta pesquisa, foi possível a produção de concretos, sendo o teor 50% de substituição de AMR o mais adequado.

A aplicação de agregados reciclados de RCC em concretos estruturais requer um controle no momento de dosagem e estudos aprofundados em relação à durabilidade desse material. Nesse sentido, devem ser consideradas outras propriedades que não foram avaliadas no presente estudo, como retração, fluência, permeabilidade e durabilidade de concretos produzidos com RCC.

Referências

- ANGULO, S. C. **Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de Suas Características no Comportamento Mecânico de Concretos**. São Paulo, 2005. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova: especificação. Rio de Janeiro, 2003c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: especificação. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005a.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: concreto fresco: determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 46**: agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003a.
- BUTTLER, A. M. **Concreto Com Agregado Graúdo Reciclado**: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. São Carlos, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- CABRAL, A. E. B. **Modelagem de Propriedades Mecânicas e de Durabilidade de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados, Considerando-se a Variabilidade da Composição do RCD**. São Carlos, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.
- CABRAL, A. E. B. Mechanical Properties Modeling of Recycled Aggregate Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 421-430, 2010.
- CARRIJO, P. M. **Análise da Influência da Massa Específica de Agregados Graúdos Provenientes de Resíduos da Construção e Demolição no Desempenho Mecânico do Concreto**. São Paulo, 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical Behaviour of Concrete Made With Fine Recycled Aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 5, p. 397-401, 2007.
- EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Durability Performace of Concrete Made With Fine Recycled Concrete Aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 9-14, jan. 2010.
- FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Brasil 2022: planejar, construir, crescer. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO: CONSTRUBUSINESS, 9., São Paulo, 2010. **Anais...** São Paulo: FIESP, 2010.
- FONSECA, A. P. Estudo Comparativo de Concretos Com Agregado Graúdo Reciclado de Telha Cerâmica e Agregado Graúdo Natural. Uberlândia: UFU, 2006.
- GUSMÃO, A. D. **Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Recife: Gráfica Editora, 2008. 140 p.
- HELENE, P. R. L. Dosagem de Cimento Portland. In: ISAIÁ, G. C. (Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1, p. 75-107.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Contas Nacionais Trimestrais**: indicadores de volume e valores correntes. Out./dez. 2011. 42 p. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Contas_Nacionais/Contas_Nacionais_Trimestrais/Fasciculo_Indicadores_IBGE/2011/pib-vol-val_201104caderno.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2014.
- JI CHEN, H.; YEN, T.; HUNG CHEN, K. Use of Building Rubbles as Recycled Aggregates. **Cement and Concrete**, v. 33, p. 125-132, 2003.
- JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000. 113 f. Tese (Livre-docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- LA SERNA, H. A.; RESENDE, M. M. **Agregados Para a Construção Civil**. Brasília: DNPM, 2009. Disponível em: <http://anepac.org.br/wp/wp-content/uploads/2011/07/DNPM2009.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2012.

- LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados de Resíduos da Construção e Demolição**. Porto Alegre, 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Porto Alegre, 2001.
- LEVY, S. M. **Reciclagem do Entulho da Construção Civil, Para Utilização Como Agregados Para Argamassas e Concretos**. São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, São Paulo, São Carlos, 1997.
- LEVY, S. M. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos, Produzidos Com Resíduos de Concreto e Argamassa**. São Paulo, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- LOVATO, P. S. **Verificação dos Parâmetros de Controle de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Para Utilização em Concreto**. Porto Alegre, 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.
- SOUZA; L. M.; CABRAL; A. E. B. **Avaliação da Absorção de Água de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados de Concreto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 51., Curitiba, 2009. **Anais...** Curitiba, 2009.
- TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação das Propriedades do Concreto Com Agregados Reciclados de Resíduos da Construção e Demolição Visando Aplicações Estruturais**. Maceió, 2007. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.
- VIEIRA, G. L. **Estudo do Processo de Corrosão Sob a Ação de Íons Cloreto em Concretos Obtidos a Partir de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. Porto Alegre, 2003. (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- YAPRAK, H. *et al.* Effects of the Fine Recycled Concrete Aggregates on the Concrete Properties. **International Journal of the Physical Sciences**, v. 6, p. 2455-2461, may 2011.
- ZORDAN, S. E. **A Utilização do Entulho Como Agregado, na Confecção de Concreto**. Campinas, 1997. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

Clarissa Ribeiro de Sá Rodrigues

Escola Politécnica | Universidade de Pernambuco | Rua Benfica, 455, Madalena | Recife - PE - Brasil | CEP 50751-450 | Tel.: (81) 3184-7566 | E-mail: clarissa.rsr@gmail.com

Stela Fucale

Escola Politécnica | Universidade de Pernambuco | Tel.: (81) 3184-7549 | Email: sfucale@yahoo.com.br

Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br